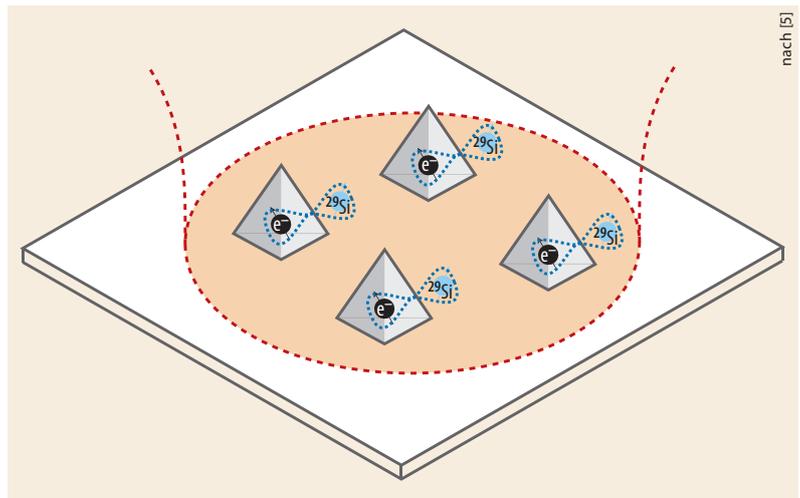


## ■ Verschränkte Quanten im Wafer

Defekte in Siliziumkarbid könnten neue Quantentechnologien ermöglichen.

Defekte spielen eine große Rolle für das Verhalten von Halbleitern. So verändern Fremdatome die elektrische Leitfähigkeit, was die Basis für moderne elektronische Bauelemente ist. Andere Defekte beeinflussen die Farbe von Kristallen und heißen daher „Farbzentren“. In den vergangenen Jahren hat sich für diese eine neue Anwendungsmöglichkeit eröffnet: Mit einfachen experimentellen Methoden lassen sich die quantenmechanischen Eigenschaften der Farbzentren kontrollieren. Das macht sie zu Kandidaten für Quantenbits. Neben den klassischen Bit-Zuständen tragen Quantenbits auch Informationen aus ihrer quantenmechanischen Überlagerung. Farbzentren könnten neuartige Quantentechnologien ermöglichen.

Das negativ geladene Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum in Diamant (NV-Zentrum) ist das bekannteste und am besten erforschte Farbzentrum. Es entsteht auf natürliche Weise, wenn ein Stickstoffatom (N) und eine Gitterfahle (V, „Vacancy“) ein Paar benachbarter Kohlenstoffatome im Diamant ersetzen [1]. Das NV-Zentrum verhält sich wie ein Ion mit Spin  $S = 1$ , das im Festkörper gefangen ist, weil seine relevanten energetischen Eigenzustände innerhalb der Bandlücke liegen. Dadurch ist der elektronische Spinzustand



nach [5]

Im Experiment werden etwa tausend Paare von PL6-Zentren (Pyramiden) und  $^{29}\text{Si}$ -Kernen (hellblau) auf einem Probenchip adressiert. Um die Paare zeitgleich zu initialisieren, zu verschränken (blaue

Schleifen) sowie letztlich auszulesen und zu verifizieren, wird das Siliziumkarbid im Fokus des Lasers (rot) angeregt und mit magnetischen Spinresonanzpulsen polarisiert.

sehr stabil und lässt sich zudem mit herkömmlichen Spinresonanztechniken kohärent manipulieren. Daneben hängt der optische Zyklus vom Spin ab: Die ursprüngliche elektronische Spinprojektion legt die Energiezustände fest, die bei der Relaxation nach optischer Anregung durchlaufen werden. Daher ist es möglich, das NV-Zentrum optisch zu polarisieren und seinen Spin zu messen. Der Spinzustand des Defekts ist somit einfach zu initialisieren, zu kontrollieren und als stabiler Quantenzustand zu messen. Diese Eigenschaften machen das NV-Zentrum als Quan-

tenbit attraktiv und erlaubten es im letzten Jahrzehnt, eine Vielzahl neuer Quantentechnologien z. B. in der Informationsverarbeitung, der Kommunikation und der Metrologie zu demonstrieren [2].

Die Frage liegt nahe, inwieweit sich diese reizvollen Eigenschaften des NV-Diamant-Systems auch in anderen Defekten finden. Insbesondere wäre es für praktische Anwendungen vorteilhaft, entsprechende Defekte in Materialien zu identifizieren, für die es massentaugliche Fabrikationsmethoden gibt, die besser verstanden sind als für Diamant. Als mögliche Alternativen haben sich in der jüngsten Vergangenheit eine Reihe von neu entdeckten, natürlich entstehenden Defekten in Siliziumkarbid (SiC) hervor getan. Für SiC existieren basierend auf Wafern ausgereifte Fabrikationsmethoden, was die Herstellung komplexer Bauelemente erheblich erleichtert. Sowohl in einzelnen Defekten als auch in Ensembles gelang es bereits, den elektronischen Spinzustand zu bestimmen und zu zeigen, dass er kohärent zu manipulieren ist [3]. Damit Technologien, die auf quantenmechanischen Prinzipien basieren, einen Vorteil gegenüber klassischen Methoden bieten, be-

### KURZGEFASST

#### ■ Leuchtender Rekord

Eine internationale Gruppe von Astronomen hat die bisher hellste Supernova beobachtet. Die absolute Leuchtkraft von SN 2015L war mit  $-23,5$  Magnituden mehr als doppelt so groß wie bei den vormals hellsten Supernovae. Noch ist unklar, wie es zu dieser gewaltigen Explosion kam. Gängige Modelle können nur schwer erklären, welcher Mechanismus die bisher abgestrahlte Energie erzeugen könnte. Außerdem ist die Muttergalaxie keine Zwerggalaxie mit aktiver Sternbildung, in denen bisher die meisten superhellen Supernovae beobachtet wurden.  
S. Dong et al., *Science* **351**, 257 (2016)

#### ■ Turbulenter Hummelflug

Die Flügel von Insekten wie Hummeln führen komplexe und sehr schnelle Bewegungen aus. Um zu verstehen, wie dies den Energieaufwand beim Flug beeinflusst, hat eine Gruppe der französischen Universität Aix-Marseille den Hummelflug in einem Windkanal numerisch simuliert. Dabei zeigte sich, dass der Energieaufwand selbst dann unverändert ist, wenn Turbulenzen mit Geschwindigkeiten bis zu 99 Prozent der Fluggeschwindigkeit auftreten. Die Ergebnisse können helfen, so genannte Mini-Drohnen zu optimieren.  
T. Engels et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 028103 (2016)

nötigen sie allerdings auch strikt quantenmechanische Zutaten wie die Verschränkung mehrerer Spins. Inzwischen ist die Kontrolle und Beobachtung solcher Phänomene beim NV-Zentrum schon fast Routine [4], wohingegen dies bei den deutlich weniger erforschten Defekten in SiC bisher ausstand.

Forschern im Labor von David Awschalom an der University of Chicago ist es nun gelungen, bei Normalbedingungen ein Ensemble von verschränkten Spinpaaren in SiC zu erzeugen [5]. Jedes Paar besteht dabei aus dem elektronischen Spin eines sog. PL6-Farbzentrums (Spin  $S = 1$  im Grundzustand) und dem Kernspin eines benachbarten  $^{29}\text{Si}$ -Atoms (Spin  $I = 1/2$ ). Die Forscher erzeugten alle vier maximal verschränkten Bell-Zustände. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass beide Spins entweder parallel oder antiparallel ausgerichtet sind, ohne dass ein einzelner Spin eine wohldefinierte Projektion besitzt. Dazu reichten bekannte und breit eingesetzte Techniken aus, obwohl das PL6-Zentrum noch weitgehend unerforscht ist – weder ist seine Struktur bekannt noch sind seine Energiezustände vollständig charakterisiert.

Um die Bell-Zustände zu präparieren, war es nötig, den Elektronen- und Kernspins zunächst einen Anfangswert optisch zuzuweisen. Mittels eines konfokalen Mikroskops wurde ein Laser so auf die Probe fokussiert, dass alle PL6-Zentren im Laserfokus optisch angeregt wurden. Da der optische Zyklus des PL6-Zentrums stark spinabhängig ist, wird der elektronische Spin nach einigen Zyklen polarisiert. Zusätzlich lag ein äußeres Magnetfeld an, wodurch die Energieniveaus von Elektronen- und Kernspins mit einer bestimmten Hyperfeinwechselwirkung besonders stark im optisch angeregten Zustand des PL6-Zentrums koppeln. Dadurch wurden alle  $^{29}\text{Si}$ -Kerne selektiert, die sich zufällig an einem bestimmten Gitterplatz relativ zu einem PL6-Zentrum befanden. In Silizium macht  $^{29}\text{Si}$  etwa 4,7 Prozent aus, woraus rund tausend adressierte Paare im Laser-

fokus resultierten. Die Kopplung der Spins führte dazu, dass mit einem „Flip“ eines Elektronenspins oft ein „Flop“ des Kernspins einherging. Daher waren auch die Kernspins am Ende der Prozedur polarisiert.

Mit Hilfe einer sog. Stripline-Antenne brachten die Forscher ein CNOT-Quantengatter mittels Magnetresonanzsignalen auf und generierten damit die Bell-Zustände. Die Verifizierung der verschränkten Zustände erfolgte mit Quantentomographie. Da der optische Zyklus und damit die Intensität der gemessenen Fluoreszenz sowohl vom Elektronenspin als auch vom Kernspin abhängt, lässt sich der Quantenzustand der Bell-Paare rekonstruieren. Daraus folgt die Güte des Zustands, die mit etwa 90 Prozent relativ hoch war, und der Beweis, dass Verschränkung generiert wurde.

Dieses Ergebnis bietet einige vielversprechende Perspektiven für künftige Anwendungen. Quantenkontrolle in einem Material zu demonstrieren, das sich für skalierbare Fabrikation eignet und quantenmechanisches Verhalten bei Normalbedingungen zeigt, ist wichtig für die Entwicklung von Quantensensoren, die biologische Strukturen visualisieren oder Biomarker verfolgen könnten [6]. Verschränkung in einem Ensemble, wie sie hier gezeigt wurde, könnte sich zudem als extrem nützlich erweisen. Die Kopplung von Feldern an  $N$  Spins anstelle von einem

einzelnen Spin ist um einen Faktor  $N^{1/2}$  stärker, was höhere Sensitivitäten ermöglicht. Außerdem sind die Systeme auch für Quantenspeicher interessant. Kernspins in Halbleitern können extrem lange Kohärenzzeiten besitzen [7], sodass man die hier gezeigten Methoden dazu nutzen könnte, um Quantenzustände in einem Ensemble von Kernspins zu „lagern“. Das wäre neben der Metrologie auch für die Quanteninformationsverarbeitung von Bedeutung.

Die Ergebnisse der Gruppe um Awschalom bringen uns neuen, praktisch einsetzbaren Quantentechnologien näher. Immer deutlicher zeichnet sich ab, dass exotische, quantenmechanische Phänomene wie die Verschränkung die Labore der Experimentalphysiker verlassen, um in der Praxis Einsatz zu finden.

Wolfgang Pfaff

- [1] F. Jelezko, Physik Journal, August/September 2008, S. 63; J. Schliemann, Physik Journal, Oktober 2010, S. 16
- [2] V. M. Acosta und P. Hemmer, MRS Bull. **38**, 127 (2013)
- [3] M. Widmann et al., Nature Mater. **14**, 164 (2015); D. J. Christle et al., Nature Mater. **14**, 160 (2015)
- [4] P. Neumann et al., Science **320**, 1326 (2008); W. Pfaff et al., Nature Phys. **9**, 29 (2013); H. Bernien et al., Nature **497**, 86 (2013)
- [5] P. V. Klimov et al., Sci. Adv. **1**, e1501015 (2015)
- [6] L. T. Hall, D. A. Simpson und L. C. L. Hollenberg, MRS Bull. **38**, 162 (2013)
- [7] P. C. Maurer et al., Science **336**, 1283 (2012); M. Zhong et al., Nature **517**, 177 (2015)

## NEMO GEFUNDEN

Wissenschaftler der ETH Zürich und des ETH-Spin-offs Scrona haben das kleinste Inkjet-Farbbild der Welt gedruckt. Das Bild zeigt Clownfische, die um eine Seeanemone herumschwimmen. Es besitzt Seitenlängen von 80 bzw. 115 Mikrometern und ist nur 0,0092 Quadratmillimeter klein. Der Druck gelang mit einer neuen 3D-Nanodruck-Technologie, die auf Quantenpunkten basiert. Indem die Forscher die Größe der Quantenpunkte veränderten, konnten sie die Farbe des abgegebenen Lichts nach Wunsch festlegen. Dazu wurden mehrere Lagen von roten, grünen und blauen Quantenpunkten übereinander gedruckt. Der Abstand zwischen zwei Pixeln betrug 500 Nanometer. Mit diesem Bild können die Wissenschaftler sich nicht nur in das Guinness Buch der Rekorde eintragen lassen. Ihre Technik ist zudem eine vielversprechende Al-



ternative für die Herstellung von Bildschirmen oder optischen Geräten. (ETH Zürich)